

Tata cara pengukuran tegangan hisap tanah zona tak jenuh menggunakan tensiometer



© BSN 2012

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh isi dokumen ini dengan cara dan dalam bentuk apapun serta dilarang mendistribusikan dokumen ini baik secara elektronik maupun tercetak tanpa izin tertulis dari BSN

BSN
Gd. Manggala Wanabakti
Blok IV, Lt. 3,4,7,10.
Telp. +6221-5747043
Fax. +6221-5747045
Email: dokinfo@bsn.go.id
www.bsn.go.id

Diterbitkan di Jakarta

Daftar isi

Daftar isi.....	i
Prakata.....	ii
Pendahuluan.....	iii
1 Ruang lingkup.....	1
2 Acuan normatif.....	1
3 Istilah dan definisi.....	1
4 Teori pengukuran.....	3
5 Persyaratan.....	8
6 Prosedur Pengukuran.....	9
7 Interpretasi hasil.....	11
8 Laporan.....	12
Lampiran A.....	13
Lampiran B.....	16
Bibliografi.....	21

Prakata

Standar Nasional Indonesia (SNI) "Tata cara pengukuran tegangan hisap tanah zona tak jenuh menggunakan tensiometer" disusun oleh dalam Gugus Kerja Hidrologi, Hidraulika, Lingkungan, Air Tanah, dan Air Baku pada Sub Panitia Teknik Bidang Sumber Daya Air yang berada di bawah Panitia Teknik Konstruksi dan Bangunan.

Penulisan Standar ini mengacu pada PSN 08:2007 dan telah mendapat masukan dan koreksi dari ahli bahasa.

Penyusunan standar ini melalui proses pembahasan pada Konsensus ulang yang dilaksanakan pada November 2011 yang dilaksanakan pada tanggal 26 September 2003 di Bandung serta proses penetapan pada Panitia Teknik dengan melibatkan para narasumber dan pakar dari berbagai instansi terkait.

Standar ini mengacu *ASTM D 3404-1991 Standard guide for measuring matric potensial in vadose zone using tensiometer*, sebagai padanan yang menjadi acuan normatif, juga merupakan kajian yang telah diterapkan pada beberapa lokasi di Indonesia. Dalam lampiran disertakan contoh hasil pengukuran, contoh kurva baku, dan formulir isian pengukuran untuk memudahkan petugas untuk melaksanakan pengukuran. Standar ini dapat menjadi pelengkap dari SNI 03-1965-1990, *Metode pengukuran kadar air tanah*, terutama untuk kegunaan pemantauan pada lokasi yang sama untuk jangka waktu yang relatif panjang.

Standar ini menguraikan tata cara pengukuran tegangan hisap tanah zona takjenuh menggunakan tensiometer, pemilihan jenis tensiometer, dan pemasangan serta pengoperasian tensiometer.

Pendahuluan

Penentuan kadar air dari batuan dan tanah yang sudah biasa dilakukan adalah dengan pemeriksaan laboratorium dari contoh yang diambil dari lapangan. Pengambilan contoh dari lapangan dan memeriksanya di laboratorium diperoleh hasil yang lebih akurat, tetapi memerlukan waktu yang relatif lama. Untuk keperluan tertentu hasil yang diperoleh tidak memerlukan keakuratan yang tinggi, dengan tensiometer dibantu kurva karakteristik kelembapan tanah bersangkutan, kadar air dapat diperkirakan lebih mudah, serta dapat digunakan untuk pemantauan secara terus menerus tanpa mengganggu kondisi tanah sekitarnya.

Pengukuran tegangan hisap tanah adalah salah satu metode untuk menentukan kadar air secara tidak langsung. Tegangan hisap tanah memiliki hubungan dengan kadar air tanah. Untuk mendapatkan nilai kadar air dari nilai tegangan hisap tanah, diperlukan kurva baku yang merupakan hubungan antara tegangan hisap dengan rentang nilai kadar air pada tanah bersangkutan.

Keuntungan cara ini adalah didapatkannya serangkaian data pemantauan dari satu lokasi untuk waktu yang terus menerus. Data tegangan hisap tanah dari beberapa titik pengukuran dapat digunakan untuk menduga pergerakan air pada tanah zona tak jenuh. Jika kurva karakteristik kelembapan tanah sebagai kurva baku diketahui, maka data tegangan hisap tanah dapat digunakan untuk memperkirakan kadar air pada tanah zona tak jenuh, mempelajari arah dan gerakan air zona tak jenuh, studi imbuhan air tanah dan manajemen irigasi.



Tata cara pengukuran tegangan hisap tanah zona tak jenuh menggunakan tensiometer

1 Ruang lingkup

Standar ini menguraikan tata cara pengukuran tegangan hisap tanah zona tak jenuh menggunakan tensiometer, pemilihan jenis tensiometer, dan pemasangan serta pengoperasian tensiometer.

Tata cara pengukuran ini meliputi.

- batas pengukuran tensiometer baku adalah 0 m sampai dengan -8,67 m air, atau tergantung spesifikasi tensiometer yang didesain khusus yang dapat mengukur sampai dengan -153 m,
- penggunaan hasil pengukuran untuk memperkiraan kadar air tanah dan,
- penggunaan hasil pengukuran untuk kepentingan penelitian dalam mempelajari arah dan gerakan air zona tak jenuh, studi imbuhan air tanah, dan manajemen irigasi.

2 Acuan normatif

SNI 03-1965-1990, Metode pengukuran kadar air tanah.

ASTM D 3404-1991, *Standard guide for measuring matric potential in the vadose zone using tensiometers.*

3 Istilah dan definisi

3.1.

Alat ukur hampa

(*vacuum gage*) adalah suatu alat untuk mengukur kehampaan yang memiliki skala dalam satuan tekanan bar, sentibar, atau milibar (lihat 4. c).

3.2

Cawan porus

(*porous cup*) adalah keramik porus cembung sebagai salah satu komponen tensiometer yang merupakan penghubung antara sumber air pada tensiometer dengan tanah tak jenuh.

3.3

pF

logaritma nilai tegangan hisap dalam cm H₂O atau $pF = \text{Log} (\text{cm H}_2\text{O})$ sebagai berikut $\psi=10$ cm H₂O maka $pF=1$, $\psi=100$ cm H₂O maka $pF=2$ dan seterusnya.

3.4

Histeresis alat

keterlambatan respon alat yang tidak langsung menanggapi perubahan kelembaban tanah sekelilingnya.

3.5

Kapasitas lapangan (*field capacity*)

kadar air tanah pada tegangan tanah yang sama dengan $10^{2,5}$ cm air, atau $pF=2,5$.

3.6

Kurva karakteristik kelembaban tanah

disebut juga kurva pF (pF curve) adalah kurva yang menggambarkan hubungan antara tegangan hisap tanah dalam pF dengan kelembaban tanah.

3.7

Manometer

alat yang berupa tabung berskala yang dihubungkan dengan tampungan air atau air raksa untuk mengukur perbedaan tekanan berdasarkan kenaikan air atau air raksa dalam tabung berskala.

3.8

Tegangan hisap (*matric potensial*)

disebut juga tekanan negatif adalah potensi yang ditimbulkan oleh daya ikatan permukaan partikel tanah dengan molekul air (adhesi) dan ikatan antarmolekul air (kohesi). Makin tinggi nilai tegangan hisap makin rendah kadar air tanah.

3.9

Tensiometer hibrida (*hybrid tensiometer*)

penggabungan antara cawan porus berdiameter besar dengan sensor tekanan berdiameter kecil.

3.10

Tensiometer

suatu alat yang dapat menciptakan hubungan hidraulik jenuh air antara tanah tak jenuh dengan sensor tekanan dengan menggunakan keramik porus sebagai penghubung keduanya.

3.11

Tegangan kelembaban tanah (*soil moisture suction*)

kesetaraan dengan perbedaan antara tekanan udara tanah dengan tekanan kelembaban tanah dengan nilai yang negatif menyatakan tegangan hisap dan dapat pula didefinisikan sebagai nilai negatif tekanan. Tegangan hisap (ψ) umumnya dinyatakan dalam satuan $\text{cm H}_2\text{O}$.

3.12

Termocouple atau *termistor*

sejenis termometer untuk mengukur suhu

3.13

Titik layu permanen (*permanent wilting point*)

kadar air tanah pada saat tumbuhan menjadi layu permanen. Pada saat itu tumbuhan sudah tidak mampu menghisap air dari tanah. Kelayuan tumbuhan yang telah melewati titik ini tidak akan pulih walaupun kadar air tanah dipulihkan kembali. Tegangan air pada titik ini adalah $pF=4,2$.

3.14

Transduser tekan (*pressure transducer*)

alat yang dapat mengubah nilai atau perubahan tekanan menjadi tegangan listrik.

3.15

Zona tak jenuh (*vadose zone*)

lapisan tanah atau batuan yang berada di atas muka air tanah.

4 Teori pengukuran

Landasan teori yang berkaitan dengan pengukuran tegangan hisap tanah dengan menggunakan tensiometer adalah sebagai berikut.

- a) Aliran tak jenuh mengikuti hukum Darcy dan mengabaikan efek osmotik, Baver et al. (1972) mengemukakan Hukum Darcy aliran tak jenuh sebagai berikut:

$$q = -k(\theta) \cdot \nabla(\psi + Z) \dots \dots \dots (1)$$

dengan :

q adalah aliran spesifik (m^3/s)

$k(\theta)$ adalah konduktivitas hidraulik tak jenuh (m/s)

ψ adalah tegangan hisap tanah pada titik [m],

Z adalah beda tinggi dari titik acuan [m],

∇ adalah gradien [m^{-1}]

$\psi + Z$ dikenal sebagai "tinggi tekan hidraulik" (*hydraulic head*)

- b) Konduktivitas hidraulik tak jenuh $k(\theta)$ dapat dinyatakan sebagai fungsi tegangan hisap ψ , atau kandungan air volumetrik θ (volume air per volume tanah) walaupun kedua fungsi tersebut dipengaruhi histeresis. Jika k diketahui sebagai fungsi θ , profil kelembaban tanah setempat (misalnya dengan metode neutron probe) dapat digunakan untuk memperkirakan k dan mengombinasikannya dengan data tegangan hisap untuk menaksir aliran.

Dalam berbagai kasus ketelitian perkiraan aliran perlu ditaksir dengan hati-hati, terutama untuk beberapa media porus yang memiliki nilai $\left[\frac{dk}{d\theta} \right]$ dan $\left[\frac{dk}{d\psi} \right]$ yang besar.

Dalam rentang ψ dan θ , perkiraan k sangat peka terhadap kesalahan pengukuran ψ dan θ di tempat pengukuran. Kesalahan pengukuran ψ secara langsung berpengaruh pada $\nabla(\psi + Z)$ dalam hukum Darcy.

Sumber kesalahan lain dalam perkiraan aliran berasal dari beberapa faktor berikut.

- 1) Ketidakakuratan data yang digunakan untuk menetapkan fungsi $k(\psi)$ atau $k(\theta)$, karena keakuratan pengukuran nilai permeabilitas yang sangat rendah sulit diperoleh;
- 2) Kerapatan pengukuran di lapangan untuk menggambarkan ψ dan θ yang kurang mencukupi akan menghasilkan hubungan tidak linear;
- 3) Parameter tanah setempat yang berbeda dengan yang digunakan untuk menetapkan $k(\psi)$ atau $k(\theta)$;
- 4) Kesalahan asumsi tentang histeresis setempat.

Penggunaan notasi analitis fungsi $k(\psi)$ atau $k(\theta)$ memudahkan simulasi komputer walaupun hanya untuk pendekatan data terukur. Di samping kemungkinan kesalahan yang besar, situasi aliran tertentu kesalahan dapat diperkecil dan prakiraan aliran yang akurat dapat diperoleh. Metode harus didukung landasan teori untuk meningkatkan keandalan prakiraan.

- c) Konsep tegangan cairan adalah perbedaan antara tekanan udara baku dengan tekanan cairan mutlak. Hubungan antara tegangan dengan tekanan digambarkan dengan persamaan berikut.

$$T_F = P_{AT} - P_F \dots\dots\dots (2)$$

dengan:

T_F adalah tegangan suatu volume zat cair (kPa)

P_{AT} adalah tekanan mutlak atmosfer (kPa), dan

P_F adalah tekanan mutlak volume suatu zat cair (kPa)

Tegangan kelembaban tanah setara dengan perbedaan antara tekanan udara tanah dengan tekanan kelembaban tanah, yaitu.

$$T_W + P_G = P_W \dots\dots\dots (3)$$

dengan:

T_W adalah tegangan suatu volume kelembaban tanah (kPa)

P_G adalah tekanan mutlak udara tanah di sekitarnya (kPa), dan

P_W adalah tekanan mutlak kelembaban tanah (kPa)

Istilah tegangan atau hisapan adalah potensial negatif yang menunjukkan bahwa hal itu bertanggung jawab bagi kemampuan tanah dalam menarik dan menyerap air (Goewono Soepardi, 1979).

Dalam standar ini diasumsikan tekanan udara tanah adalah satu atmosfer, kecuali ada catatan khusus. Kesetaraan berbagai satuan tekanan yang digunakan didefinisikan sebagai berikut.

$$1,0 \text{ atm} = 29,93 \text{ inci Hg} = 759,56 \text{ mm Hg} = 1013,3 \text{ mbar} = 1,013 \text{ bar} = 101,33 \text{ kPa} \\ = 14,7 \text{ psi} = 10335 \text{ kg/m}^2 = 1033,5 \text{ cm H}_2\text{O}$$

- d) Nilai negatif tegangan kelembaban tanah menyatakan tegangan hisap. Tegangan hisap air pada tanah tak jenuh ditimbulkan oleh daya ikatan permukaan partikel tanah terhadap molekul air (adhesi) dan ikatan antarmolekul air (kohesi) dan ketidakseimbangan pada batas air dan udara. Ketidakseimbangan ini menyebabkan permukaan air yang cembung antarpartikel tanah.
- e) Komponen dasar tensiometer terdiri atas suatu permukaan porus (umumnya keramik berupa cangkir, atau cawan) yang dihubungkan dengan sensor tekanan oleh suatu saluran yang berisi air. Kegunaan khusus tensiometer telah mengalami banyak modifikasi, tetapi komponen dasar tidak mengalami perubahan. Komponen porus ditanam pada tanah dan menyalurkan tegangan kelembaban tanah ke manometer, alat ukur hampa, atau *electronic-pressure transducer* (dalam standar ini disebut sebagai transduser tekan). Selama operasi normal, pori-pori jenuh air pada keramik mencegah masuknya udara tanah ke dalam cawan.
- f) Air menempel pada partikel tanah di bawah tegangan adalah tekanan absolut kelembaban tanah P_W yang lebih kecil dari atmosfer. Pada penampang pertemuan antara cawan porus dengan tanah tekanan ini tersalurkan melalui cawan porus jenuh air ke dalam tampungan air di dalam alat sampai terjadi kesetimbangan antara tekanan dalam cawan porus dengan manometer atau transduser tekanan.

Dalam kasus satu manometer air raksa (lihat Lampiran A Gambar 2a):

$$T_w = P_A - P_w = (\rho_{Hg} - \rho_{air})r - \rho_{air}(h + d) \quad (4)$$

dengan:

T_w adalah tegangan kelembaban tanah dalam cm kolom air pada 4° C.

P_A adalah tekanan udara dalam cm kolom air pada 4°C,

P_w adalah tekanan rata-rata dalam cawan dan tanah dalam cm kolom air pada 4°C

ρ_{Hg} adalah berat jenis rata-rata kolom air raksa

ρ_{air} adalah berat jenis rata-rata kolom air

r adalah pembacaan tinggi kolom air raksa dalam cm.

h adalah tinggi tampungan air raksa di atas muka tanah dalam cm

d adalah kedalaman cawan tensiometer di bawah muka tanah dalam cm.

- g) Walaupun berat jenis air raksa dan air bervariasi sekitar 1% pada suhu 0-45°C, persamaan di atas biasa digunakan di ρ_{Hg} dan ρ_{H_2O} tetap.

1) Pada $\rho_{Hg} = 13,54$ dan $\rho_{air} = 0,995$ (rata-rata pada rentang suhu di atas) menghasilkan kesalahan sekitar 0,25% (1,5 cm air) pada 45°C, untuk $T_w \approx 520$ cm air. Walaupun kecil, tingkat kesalahan dapat dihilangkan dengan fungsi kerapatan sebagai berikut.

$$\rho_{Hg} = 13,595 - 2,458 \times 10^{-3}(T) \quad (5)$$

$$\rho_{air} = 0,9997 + 4,879 \times 10^{-5}(T) - 5,909 \times 10^{-6}(T)^2 \quad (6)$$

dengan:

T adalah rata-rata temperatur kolom dalam °C.

- 2) Temperatur rata-rata kolom air pada bagian tensiometer di bawah muka tanah dapat diperkirakan dengan menggunakan termistor yang berhubungan dengan tabung yang diletakkan kira-kira 45% kedalaman cawan porus. Suhu udara cukup diperkirakan dari bagian yang terbuka.
- h) Alat ukur hampa yang digunakan dalam tensiometer umumnya memiliki skala dalam bar (dan sentibar) dan memiliki penyesuaian nilai nol. Penyesuaian nol dilakukan untuk menghilangkan pengaruh elevasi, tinggi alat dari cawan porus, dan perubahan internal alat menurut waktu. Penyesuaian dilakukan dengan mengisikan air pada tensiometer. Kemudian, meteran diset ke nol dan cap porus ditenamkan ke dalam air. Pengaturan dilaksanakan pada ketinggian yang sesuai dengan akan dipasangnya tensiometer, lalu diulangi secara berkala dengan cara melepas tensiometer atau alat ukurnya saja dari tanah. Alat ukur membaca tegangan yang terjadi pada cawan. Penggunaan alat ukur yang tidak dapat diset ke nol dapat menghasilkan data yang tidak tepat karena pembacaan nol dapat mencapai negatif.

- i) Transduser tekan mengkonversi tekanan atau perbedaan tekanan menjadi tegangan listrik. Transduser tekan dapat terhubung secara berjauhan dengan tabung yang terpasang langsung pada cawan porus. Tekanan mutlak (P_p) terukur oleh transduser tekan melalui sensornya. Transduser tekan mengukur perbedaan antara tekanan lingkungan atmosfer (P_A) dengan tekanan absolut (P_p) sensor. Saat $P_p < P_A$ tekanan disebut tegangan. Suatu pengembangan transduser tekan memiliki kemampuan mengukur dua jenis tekanan tersebut pada dua sensor berbeda. Ketika digunakan sebagai tensiometer, sensor kedua terhubung dengan atmosfer. Alat tersebut digunakan sebagai alat ukur tekanan dan mengukur tegangan.
- j) Persamaan untuk kalibrasi transduser tekan disertakan dari pabrik, atau ditentukan oleh pengguna untuk mengkonversi sinyal pengukuran menjadi satuan tekanan atau tegangan pada sensor transduser tekan. Tegangan pada cawan (lihat Gambar 3 c), yaitu.

$$T_w = T_p - t(\rho_{air}) \dots\dots\dots (7)$$

dengan:

T_w adalah tegangan rata-rata pada cawan dan tanah dalam cm kolom air pada 4°C,

T_p adalah tegangan pada port transduser dalam cm kolom air pada 4°C,

t adalah perbedaan elevasi antara port transduser dengan pusat cawan, cm,

ρ_{air} adalah berat jenis rata-rata kolom air dalam transduser dan cawan.

- k) Pada suhu 15°C air murni mulai menguap jika tegangannya melebihi 969 cm kolom air. Jika penguapan terjadi pada tensiometer, kesinambungan hidraulik terganggu dan pembacaan tegangan menjadi tidak benar. Air yang digunakan dalam tensiometer telah dideaerosi, tetapi beberapa pencampur dan gas terlarut menurunkan tegangan sampai sekitar 867 cm kolom air. Oleh karena itu rentang pengukuran tensiometer mengikuti persamaan.

$$T_c + \Delta h < 867 \text{ cm} \dots\dots\dots (8)$$

$$T_c < 867 \text{ cm} \dots\dots\dots (9)$$

dengan :

T_c adalah tegangan pada cawan porus dalam cm air bersuhu pada 4°C.

Δh adalah elevasi titik hidraulik tertinggi antara cawan porus dengan sensor tekanan dikurangi elevasi cawan porus dalam cm.

Persamaan 8 menunjukkan kedalaman pemasangan cawan porus dan tegangan maksimum yang dapat terukur. Persamaan 9 menetapkan nilai maksimum tegangan. Persamaan 8 dan 9 adalah pendekatan jika air tidak dideaerosi, nilai 867 akan digantikan oleh suatu nilai yang lebih kecil.

- l) Tensiometer yang telah diuraikan adalah jenis transduser tekan absolut yang mengukur tekanan kelembaban tanah secara langsung. Jenis tensiometer lain dapat mengukur $P_A - P_W$ dengan P_A adalah tekanan udara luar. Daya penggerak untuk air pada lajur tak jenuh (dengan mengabaikan potensi osmotik) adalah gradien tekanan absolut pada bentuk cair dan gravitasi. (lihat persamaan 1). Jika tekanan menyebar dengan mudah pada tanah tak jenuh, beberapa tensiometer dapat digunakan secara

langsung untuk menentukan gradien tekanan. Jika suatu perubahan tekanan barometer mempengaruhi satu cawan tensiometer tetapi tidak ke yang lainnya, (karena dibatasi suatu lapisan), penghitungan gradien yang dihitung antara kedua cawan akan salah. Jika cawan porus terisolasi dari atmosfer oleh suatu lapisan, seri data yang terbaca berdasarkan P_A tetap, fluktuasi berkorelasi dengan fluktuasi barometer. Dalam keadaan ini perekam barometer akan mencatat tekanan udara luar agar tekanan kelembaban tanah dan gradien tekanan dapat dihitung. Hasil seri data tekanan absolut kelembaban tanah pada cawan terisolasi dapat digambarkan dengan halus yang berupa gambaran perubahan yang nyata pada bentuk cair.

- m) Richards (1948 dalam ASTM D 3404-91) mendefinisikan waktu tetap untuk satu tensiometer sebagai berikut.

$$\tau = \frac{1}{k_c S} \dots\dots\dots (10)$$

dengan:

τ adalah waktu tetap, atau waktu yang diperlukan untuk mencapai 63,2% perubahan tekanan yang direkam tensiometer ketika cawan penuh terisi air

k_c adalah daya hantar cawan porus jenuh, atau volume air yang dapat melewati dinding cawan per satuan waktu per satuan hidraulik head dalam cm^2/detik .

S adalah kepekaan tensiometer atau perubahan pembacaan tekanan per satuan air yang lewat dinding cawan dalam cm^{-2} .

Daya hantar cawan porus dapat juga dinyatakan sebagai:

$$k_c = \frac{kA}{W} \dots\dots\dots (11)$$

dengan:

k_c adalah daya hantar cawan porus dalam $\text{cm}^2/\text{detik}^{-1}$.

k adalah permeabilitas bahan cawan dalam cm detik^{-1}

A adalah rata-rata luas permukaan bahan cawan porus yang diperkirakan luas bidang dalam sama dengan luas bidang luar dalam cm^2

W adalah tebal rata-rata dinding cawan porus dalam cm .

- n) Definisi Richards (1948 dalam ASTM D 3404-91 *Standard guide for measuring matric potensial in the vadose zone using tensiometer*) tidak berlaku untuk tensiometer yang ditanam dalam tanah sebab konduktivitas tanah (k_s) satu seri dengan k_c , dan umumnya $k_s < k_c$. Waktu tetap di lapangan tidak dapat didefinisikan sebab tanggapannya tidak logaritmis pada berbagai k_s untuk mencapai kesetimbangan. Istilah "waktu tanggapan" digunakan untuk menjelaskan tanggapan lapangan terhadap perubahan tekanan. Istilah waktu tanggapan jangan dikacaukan dengan istilah waktu tetap sebab dua tensiometer dengan tetapan-waktu sama ditempatkan pada lahan yang sama akan mempunyai waktu tanggapan yang berbeda. Contoh jika $k_{c1} = 10 k_{c2}$, dan $S_2 = 10 S_1$ kemudian $\tau_1 = \tau_2$ tetapi jika $k_s \cong k_c$, kemudian waktu tanggap₁ > waktu tanggap₂. Meskipun begitu, τ yang didefinisikan di sini dapat digunakan secara komparatif untuk

membantu mengevaluasi desain tensiometer. Kepekaan lebih tinggi, luas permukaan, permeabilitas cawan porus, dan ketebalan dinding cawan porus adalah karakteristik suatu tensiometer dengan waktu tanggap pendek. Penggunaan suatu transduser tekan yang sensitif merupakan cara paling efektif untuk mengurangi waktu tanggap pada tanah dengan permeabilitas rendah.

- o) Gelembung udara yang menghalangi kesinambungan hidraulik antara cawan porus dengan sensor tekanan menyebabkan perubahan penghitungan nilai P_w sebagai berikut:

$$\Delta = (E_p - E_c) \rho_{air} \dots\dots\dots (12)$$

Dengan

Δ adalah perubahan penghitungan nilai P_w dalam sentimeter air pada 4°C.

E_p adalah tinggi ujung gelembung yang paling dekat sensor tekanan dalam sentimeter.

E_c adalah tinggi ujung gelembung yang paling dekat cawan porus dalam sentimeter.

ρ_{air} adalah kepadatan air dalam gram/cm³.

Jika gelembung yang terdeteksi dan terukur menjadi koreksi nilai P_w yang dihitung dengan persamaan 4 dan 7. Gelembung kecil yang menempel pada dinding tabung dan tidak menghalangi secara melintang tidak mempengaruhi nilai P_w yang dihitung.

- p) Pembahasan sebelumnya menunjukkan adanya hubungan antara tegangan dengan kadar air. Hubungan tersebut dapat dipetakan dalam kurva karakteristik kelembaban tanah. Banyak faktor yang mempengaruhi hubungan tersebut. Oleh karena itu, kurva karakteristik kelembaban tanah akan bersifat khas untuk jenis dan kondisi tanah tertentu. Contoh kurva karakteristik kelembaban tanah dapat dilihat pada Gambar A2 dan Gambar A3 Lampiran A. Jika kurva tersebut tersedia, dengan mengetahui nilai tegangan dapat diketahui kadar airnya.

5 Persyaratan

5.1 Peralatan

Persyaratan peralatan yang digunakan harus memenuhi hal-hal berikut.

- Tipe-tipe tensiometer dapat dilihat pada Gambar A1 Lampiran A dan karakteristik masing-masing tipe dicantumkan pada Tabel B1 Lampiran B.
- Tensiometer harus dikalibrasi untuk menentukan skala nol dan skala penuh.
- Air yang digunakan dalam tensiometer adalah air suling.
- Tensiometer standar hanya dapat mengukur tegangan sampai -8,67 m H₂O atau ditentukan dalam spesifikasi peralatan.

Untuk tegangan yang lebih besar (sampai -153 m H₂O atau -15 bar) harus digunakan tensiometer khusus.

- Sensor yang digunakan harus tepat dan teliti.

5.2 Pengukuran

Persyaratan pengukuran harus memenuhi hal-hal berikut.

- Antara tanah dengan peralatan harus terhubung secara hidraulik dan diusahakan tidak ada gelembung udara.
- Penempatan peralatan harus stabil dan seimbang.
- Untuk mengetahui kadar air berdasarkan hasil pengukuran tensiometer, harus diketahui kurva karakteristik kelembaban tanah. Contoh kurva karakteristik kelembaban tanah dapat dilihat pada Tabel B.3 Lampiran B.

6 Prosedur Pengukuran

6.1 Pemilihan tipe peralatan

Tentukan tipe peralatan yang harus disediakan menurut kebutuhan ketelitian, kegunaan dan kemudahan pengoperasiannya berdasarkan Tabel B.1 pada Lampiran B. Tiap tipe tensiometer memiliki kelebihan dan kekurangan.

6.1.1 Tipe alat ukur hampa

Umumnya memiliki cawan porus lebih besar dari 2,5 cm dan tersambung menempel pada tabung dengan diameter sama. Skala tegangan dari 0 kPa sampai dengan 100 kPa terdapat pada sisi dalam tabung. Ruang antara alat ukur hampa dengan puncak tabung berfungsi untuk menampung udara. Ketika permukaan air di dalam tabung mendekati inlet, tutup tabung terbuka dan ruang udara terisi air. Kekurangan dan kelebihan tensiometer alat ukur hampa adalah sebagai berikut.

- Sederhana dalam penggunaan dan pemeliharaan koneksi hidraulik antara meter dengan cawan porus;
- Ketepatan, ketelitian, rendah, dan histeresis kurang baik;
- Berguna untuk penjadwalan irigasi yang tidak memerlukan ketelitian tinggi;
- Tidak direkomendasikan untuk mengukur gradien hidraulik tanah tak jenuh.

6.1.2 Tipe manometer

Tipe ini umumnya menggunakan manometer air raksa dengan model hibrida. Hampir semua udara dikumpulkan di puncak tensiometer. Kelebihan dan kelemahan tensiometer manometer adalah sebagai berikut.

- Manometer air raksa merupakan sensor tekanan paling tepat dan teliti serta histeresis sangat baik.
- Tidak memerlukan kalibrasi.
- Kekurangan tensiometer manometer adalah pada pemakaian di tanah yang memiliki kadar air sangat rendah, air raksa dapat terhisap memasuki cawan porus. Untuk memperbaikinya perlu penanganan khusus.

6.1.3 Tipe transduser tekan

Tensiometer tekanan yang dilengkapi dengan transduser tekan dapat mengubah tegangan hisap menjadi sinyal listrik. Tensiometer tipe ini sesuai untuk mengumpulkan data dalam

jumlah besar karena dapat dibuat otomatis dan dapat dibuat perekaman dengan log data atau kertas perekam. Unsur utama transduser tekan adalah resistor semikonduktor yang ditempelkan pada diafragma yang mudah bergerak oleh perubahan tekanan. Kelebihan dan kekurangan tensiometer transduser tekan, antara lain sebagai berikut.

- a) Bisa digunakan secara otomatis untuk pemantauan dengan menghubungkannya pada alat perekam.
- b) Ketelitian, ketepatan, dan histeresis dari sedang sampai dengan sangat baik.
- c) Perlu dilakukan recalibrasi sebelum alat dikuburkan karena keseluruhan rangkaian yang telah dikuburkan dalam tanah tidak mungkin lagi dibersihkan dan tekanan transduser tidak bisa dikalibrasi kembali. Diperlukan suatu sistem pembersihan agar kelangsungan operasi tidak terganggu.

6.2 Pemasangan peralatan

Pemasangan peralatan di lapangan mengikuti langkah-langkah berikut.

- a) Periksa cawan porus, pipa penghubung, seluruh sambungan, peralatan ukur yang diperlukan sebelum pemasangan. Setelah cawan porus dijenuhkan, gunakan pompa hisap. Jika gelembung udara yang tampak pada pengukur tekanan kurang dari tekanan cawan porus, peralatan sudah cacat dan perlu diganti.
- b) Buat lubang dengan alat pengeboran yang tersedia sebagai perlengkapan atau dengan pipa biasa dengan diameter yang sesuai dengan cawan porus. Pada tanah berbatu diameter lubang harus sedikit lebih besar dari diameter cawan porus. Tanah yang terangkat perlu disimpan secara berurutan sesuai kedalaman untuk mengisi kembali lubang yang dibuat.
- c) Jika tanah lunak, paksakan cawan porus agar masuk. Jika tanah keras, perlu diperlunak dengan air. Jika tanah berbatu, masukkan cawan porus dengan hati-hati.
- d) Timbun lubang dengan tanah bekas galian. Tanah yang terakhir diangkat dari lubang menjadi bahan timbunan pertama dan seterusnya secara berurutan sampai tanah yang pertama diangkat untuk meniru pelapisan tanah asal.
- e) Usahakan pemadatan relatif sedikit lebih padat daripada tanah tak terganggu. Padatkan tanah timbunan secara hati-hati. Adanya jarak antara tanah dengan cawan porus akan mempengaruhi waktu tanggap alat dan memperkecil luas efektif permukaan cawan porus. Pada kasus terburuk tidak terjadi hubungan hidraulik. Penggunaan pipa bantu dapat digunakan pada waktu pengurugan dan pemadatan.
- f) Isi tensiometer dengan air. Pada saat air digunakan untuk membentuk hubungan hidraulik, tegangan air sekitar cawan porus akan menurun. Selanjutnya data tensiometer akan menunjukkan pemulihan secara alami.
- g) Untuk mengukur profil vertikal atau gradien tekanan beberapa tensiometer berdiameter kecil dapat dipasang pada satu lubang dengan kedalaman berbeda.
- h) Pemasangan tensiometer pada kedalaman dapat dilakukan dengan mengebor lubang horisontal secara radial dari pusat lubang sumuran. Metode ini menjaga kondisi-kondisi tak terganggu di atas dan di bawah cawan porus. Penimbunan lubang horisontal dengan satu tangkai dapat dilakukan dengan hati-hati. Alternatif lain adalah menimbun sekitar cawan porus dan menyekat sisa lubang dengan lapisan insulasi. Transduser tekan akan bekerja baik jika panjang pipa keseluruhan yang menghubungkan cawan porus dengan transduser tekan adalah horisontal dan gelembung udara tidak menyebabkan kesalahan. Hal itu juga akan memperkecil permasalahan kepekaan pada perubahan temperatur transduser sebab temperatur di dalam lubang relatif tetap.

6.3 Pengoperasian peralatan

Pengoperasian peralatan mengikuti langkah-langkah berikut.

- Kurangi udara terlarut dalam air dengan cara pemanasan pada bejana khusus dan penghampaan, dihisap dengan pompa hisap yang menghasilkan hisapan 970 cm H₂O, dan diaduk dengan pemanas magnetis selama 48 jam. Pemindahan air dilakukan dengan selang dan tidak berkontak dengan udara untuk menghindari aerasi kembali.
- Isikan air awaudara atau air suling ke dalam tensiometer. Pada tensiometer berdiameter kecil dilakukan dengan menghubungkan tabung persediaan air dengan wadah tampungan air dan mengisikannya sampai penuh saat klep inlet terbuka. Beberapa tensiometer dapat dihubungkan dengan jaringan pengisian.
- Bersihkan alat ukur hampa atau tensiometer hibrida sesuai dengan instruksi dari pabrik pembuatnya.
- Ketika pengisian telah selesai, sistem tertutup dan kelembaban tanah akan mempengaruhi cawan porus sampai terjadi keseimbangan. Tegangan dalam cawan porus mendekati kelembaban tanah secara asimtot dengan laju dipengaruhi waktu untuk mencapai konstan dan konduktivitas tanah jenuh.
- Jika tanah kering atau desain manometer kurang baik, air raksa dapat masuk ke dalam cawan porus. Terapkan tekanan pada puncak tensiometer agar air raksa keluar dari tabung pengukuran.
- Catat nilai tegangan hisap tanah ketika keseimbangan telah tercapai.
- Cawan porus dapat dikeluarkan dari tanah untuk digunakan kembali pada waktu dan tempat yang berbeda. Bersihkan cawan porus untuk mencegah penyumbatan pori-pori dengan air hangat. Jika pori cawan porus tersumbat, bilas dengan larutan HCl lemah.

7 Interpretasi hasil

7.1 Gerakan air zona tak jenuh

Dalam zona tak jenuh air bergerak dari titik yang memiliki kadar air lebih tinggi menuju titik yang memiliki kadar air lebih rendah. Makin tinggi kadar air makin rendah nilai tegangan kelembaban tanah atau nilai tegangan hisapnya. Sebaliknya, makin rendah kadar air makin tinggi nilai tegangan tanah.

7.2 Pendugaan kadar air tanah

Kadar air tanah dapat diperkirakan dengan mengeplot nilai tegangan hisap tanah pada kurva karakteristik kelembaban tanah.

7.3 Pendugaan kebutuhan irigasi

Kelembaban tanah yang berguna untuk tanaman adalah yang berada dalam kisaran antara titik layu permanen pada tegangan $pF = 4,2$ dan kapasitas lapangan pada tegangan $pF=2,5$ (Kohnke, 1968; Linsley et al, 1988; Chorley, 1969). Selisih antara tegangan pada kapasitas lapangan dengan nilai tegangan terukur merupakan kebutuhan yang harus ditambahkan. Jumlah air yang harus ditambahkan diketahui dengan menggunakan kurva karakteristik kelembaban tanah.

8 Laporan

Laporan harus mencakup informasi sebagai berikut.

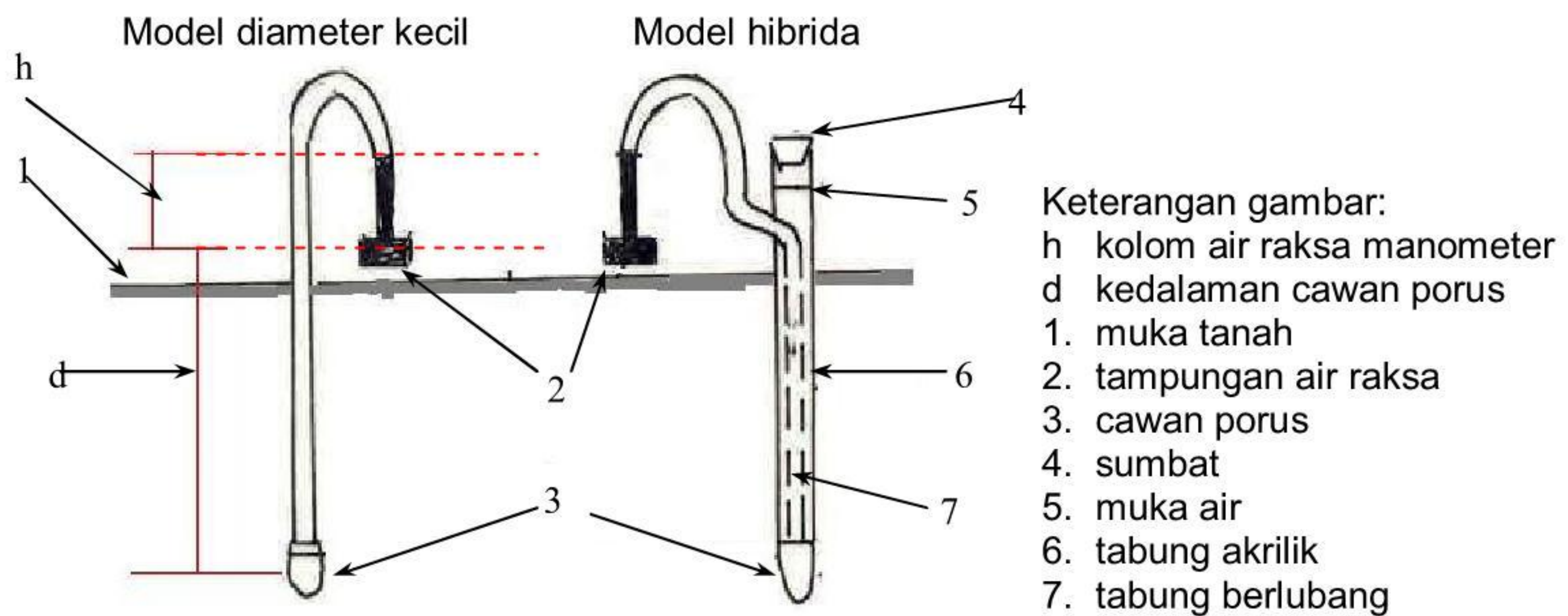
- a) nomor titik pengukuran,
- b) orientasi lokasi pengukuran,
- c) penggunaan lahan,
- d) karakteristik tanah,
- e) kedalaman pemasangan cawan porus,
- f) spesifikasi tensiometer;
- g) nama pengamat,
- h) tabel ringkasan hasil pengukuran tiap titik,
- i) kurva karakteristik kelembaban tanah (jika tersedia) dan
- j) hasil interpretasi.



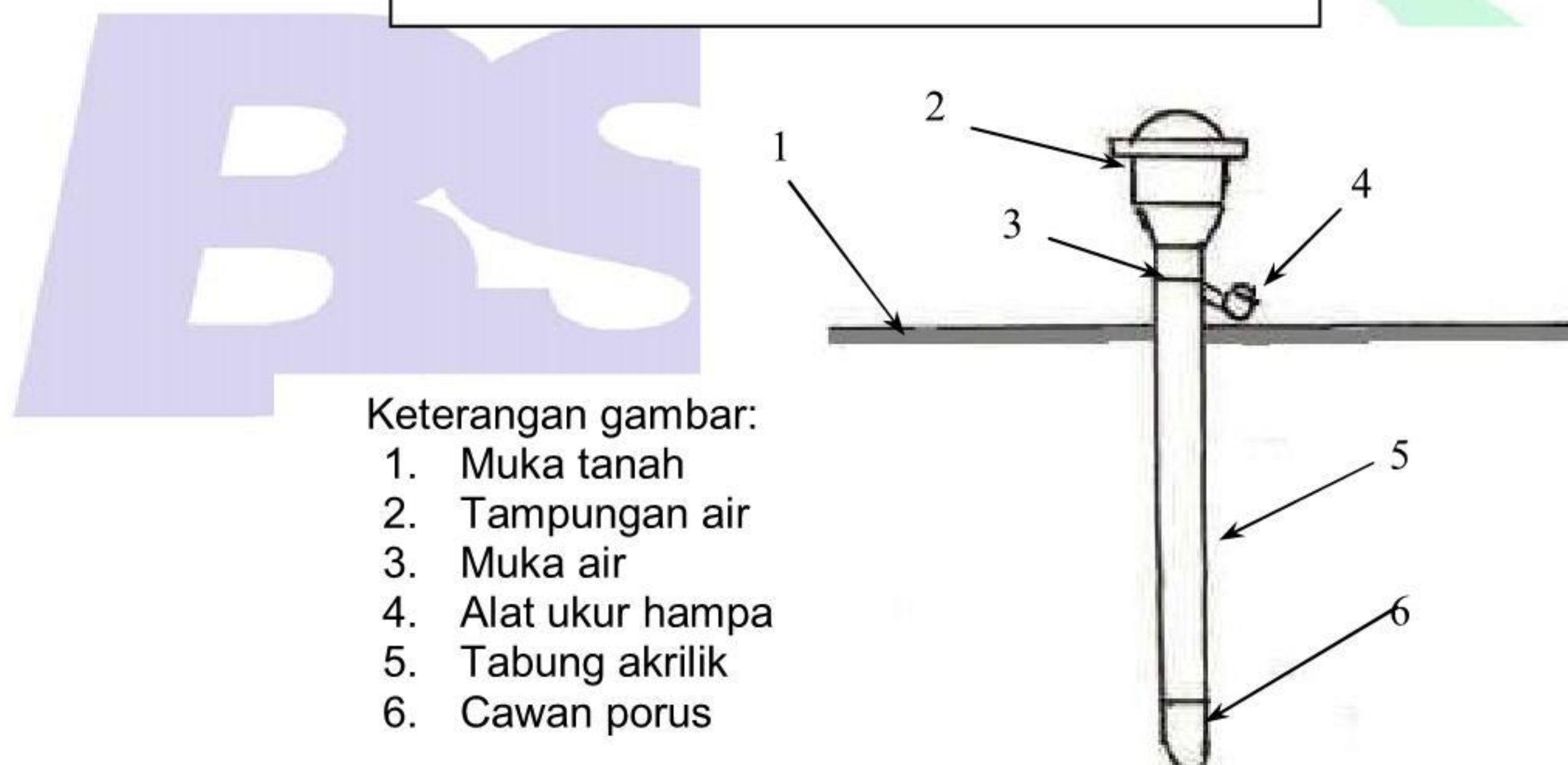
Lampiran A

Gambar

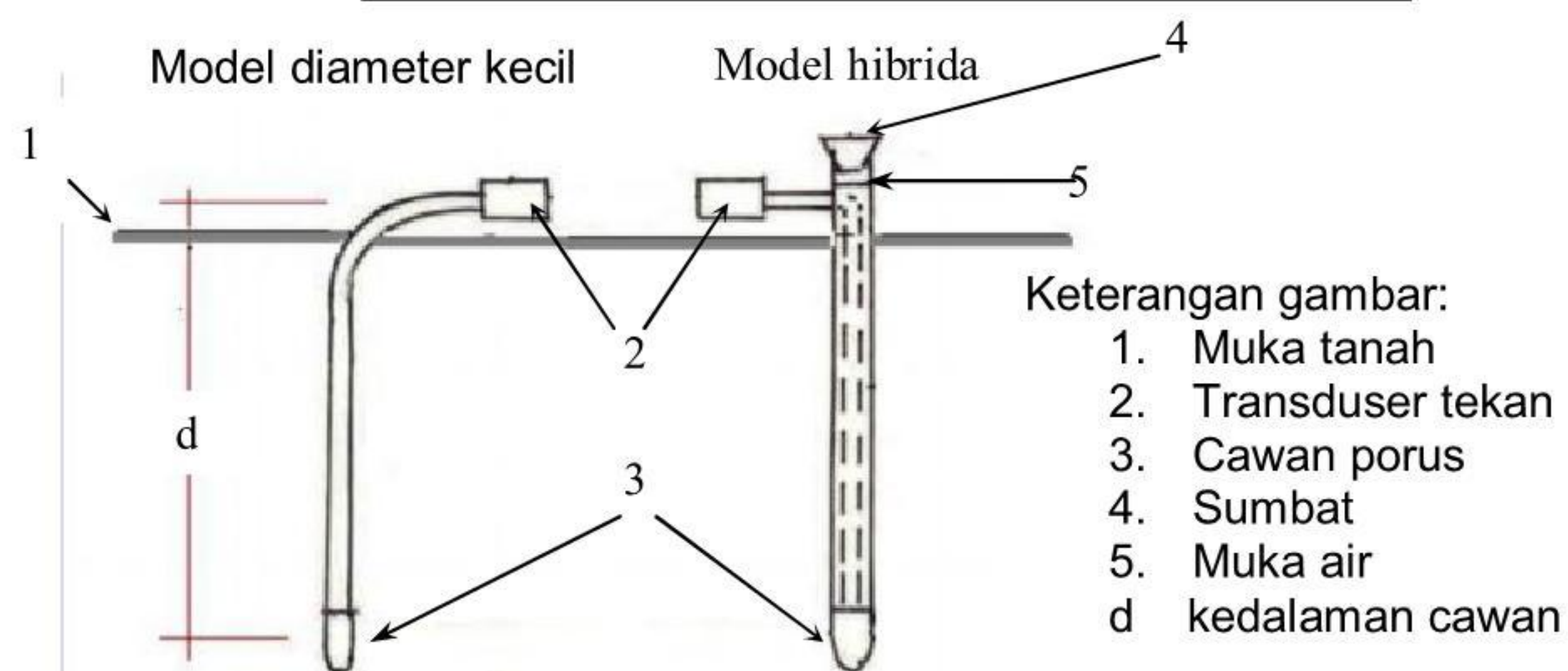
A. Tensiometer tipe alat ukur hampa:



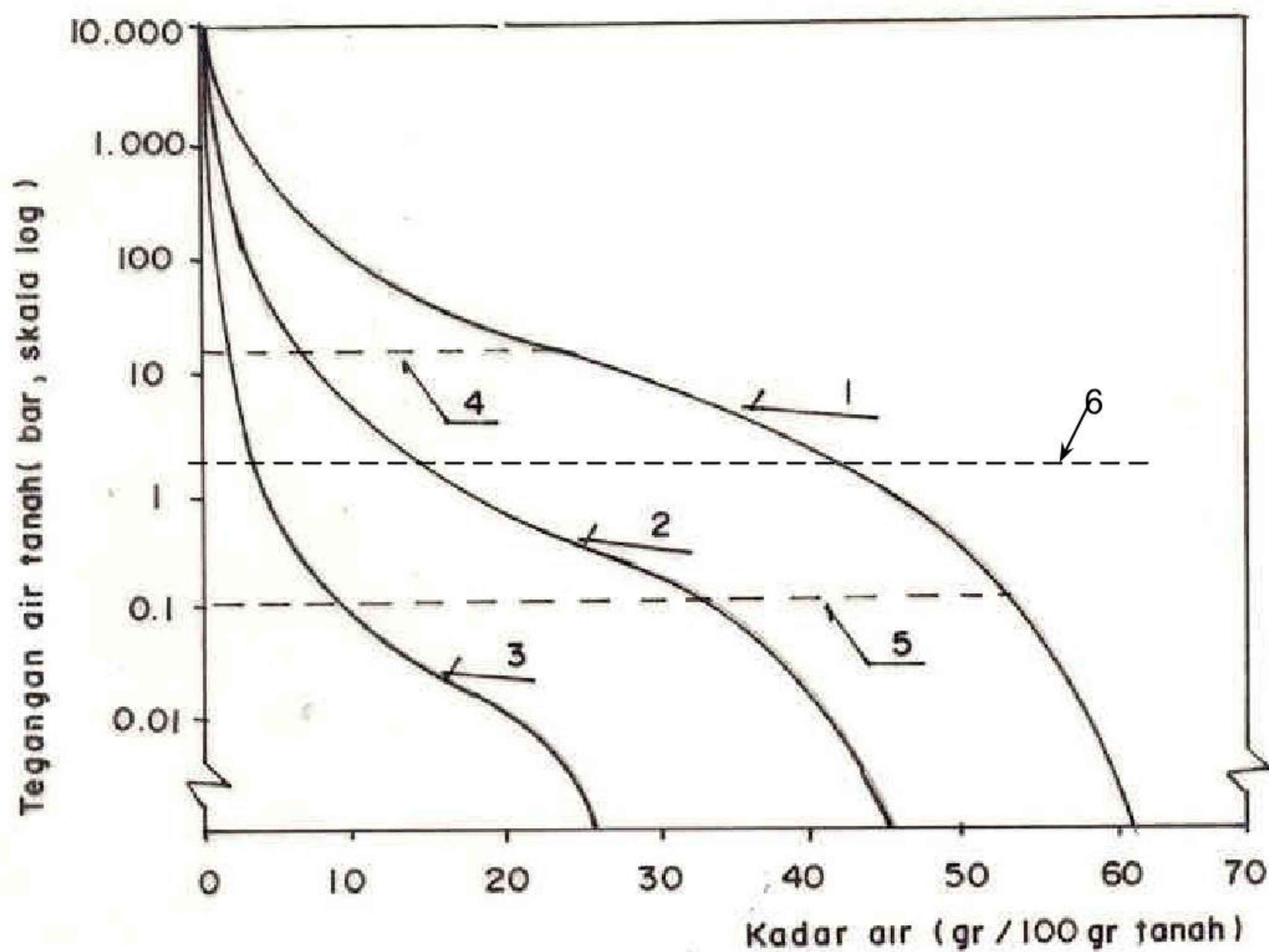
B. Tensiometer tipe alat ukur hampa



C. Tensiometer tipe transduser tekan:



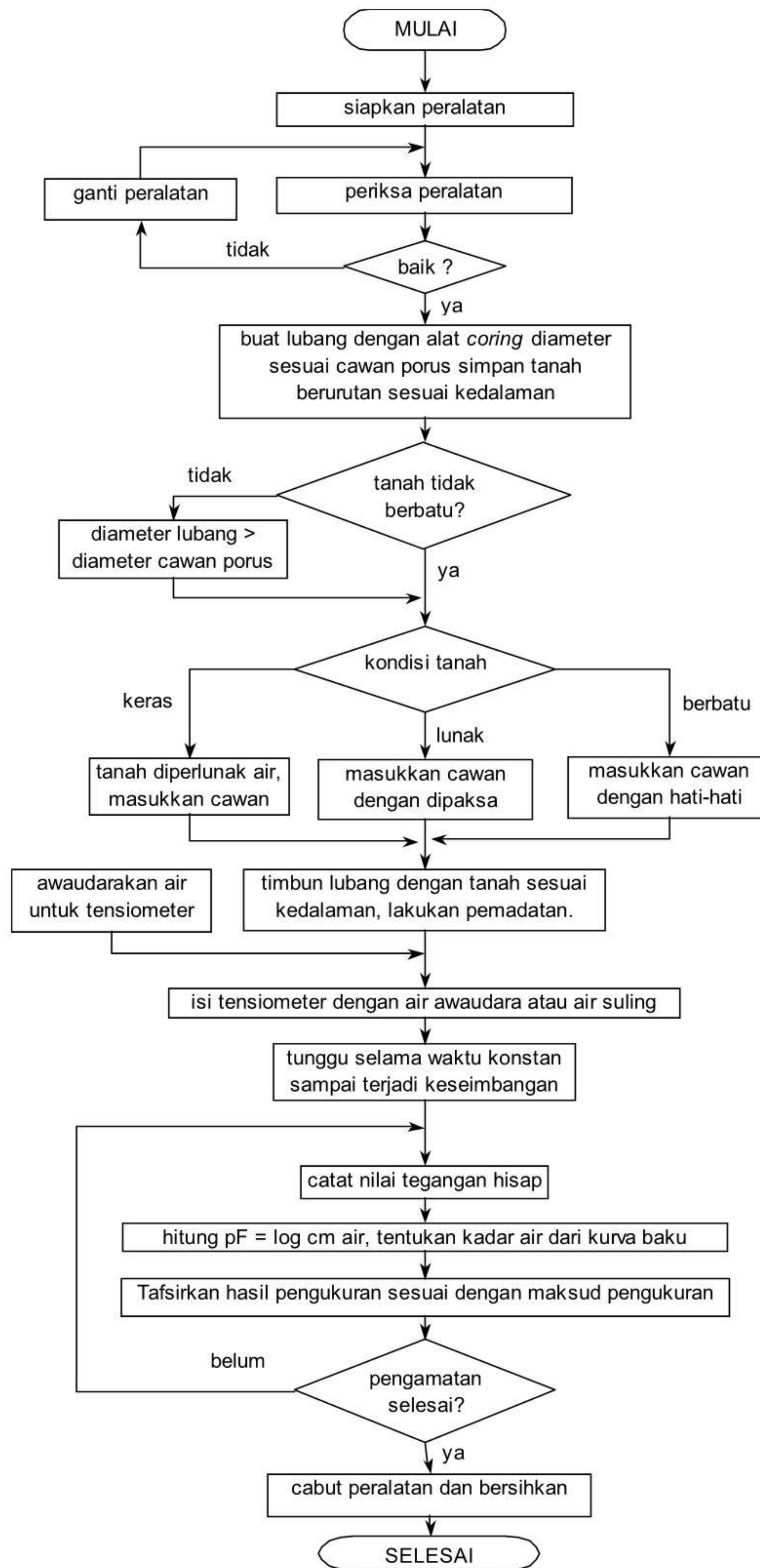
Gambar A.1 Skema peralatan



Keterangan gambar:

1. Kurva karakteristik kelembaban tanah tekstur lempung
2. Kurva karakteristik kelembaban tanah tekstur geluh
3. Kurva karakteristik kelembaban tanah tekstur pasir
4. Tegangan kelembaban tanah pada titik layu ($pF=4,2$).
5. Tegangan kelembaban tanah pada kapasitas lapangan ($pF=2,5$)
6. Batas atas tegangan tanah yang dapat terukur oleh tensiometer ($pF=2,93$ atau 867 cm air)

**Gambar A.2 Tipe kurva teoritis karakteristik kelembaban berbagai tekstur tanah
(Goeswono Soepardi, 1979)**



Gambar A.3 Diagram alir pengukuran tegangan hisap tanah dengan tensiometer

Lampiran B

Tabel

Tabel B.1 Karakteristik Tensiometer

Karakteristik	Di pasaran		Konstruksi			
	Alat ukur hampa	Manometer hibrid	Manometer		Transduser	
			ϕ kecil	hibrid	ϕ kecil	hibrid
Ketepatan	Rendah	Sangat baik	Sangat baik	Sangat baik	Baik - sangat baik	Baik - sangat baik
Ketelitian ¹	Rendah	Baik	Baik	Baik	Sangat baik	Sangat baik
Histeresis	Rendah	Sangat baik	Sangat baik	Sangat baik	Sedang - sangat baik	Sedang - sangat baik
Waktu tanggap	Rendah-sangat baik	Sedang	Sedang	Sedang	Sangat baik	Sangat baik
ketelitian aplikasi	Sedang	Sedang	Sangat baik	Sedang	Sangat baik	Sedang
Keawetan	Baik	Baik	Baik- sangat baik	Baik	Baik	Baik
Pembersihan	jarang	Jika diperlukan	Sering	Jika diperlukan	Sering	Jika diperlukan
Rekalibrasi	Jika diperlukan	Tak pernah	Tak pernah	Tak pernah	Sering	Sering
Metode koleksi data	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual atau otomatis	Manual atau otomatis

Keterangan:

1: ketelitian (ulangan) laju pengeringan pembasahan untuk mengurangi efek histeresis

Tabel B.2 Formulir pengukuran tegangan hisap tanah


1. Nomor titik :
2. Lokasi :
.....
3. Penggunaan lahan :
.....
4. Karakteristik tanah :
.....
5. Spesifikasi tensiometer:
.....
6. Kedalaman cawan :
7. Pengamat :
8. Keterangan tambahan :



Sketsa orientasi lokasi potensiometer

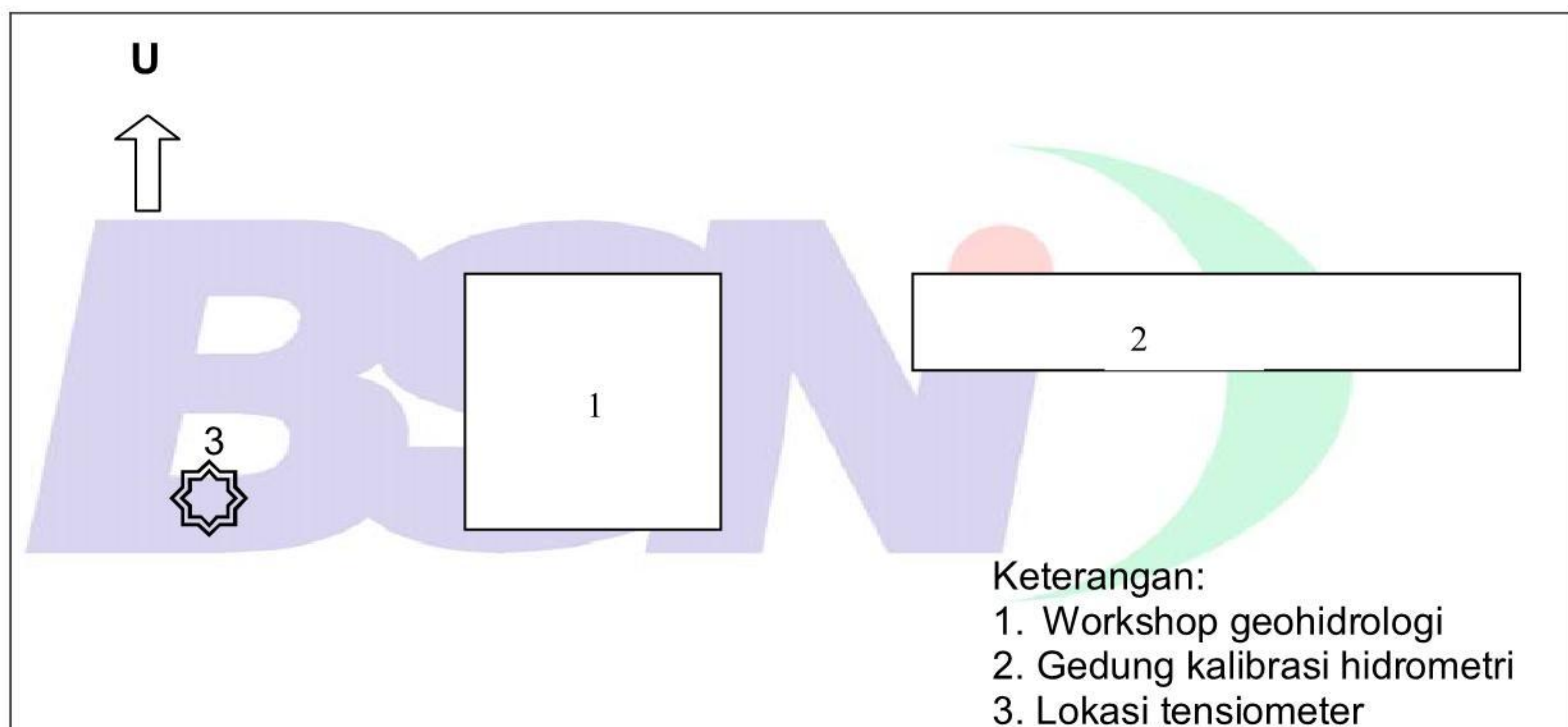


Kurva karakteristik kelembaban tanah

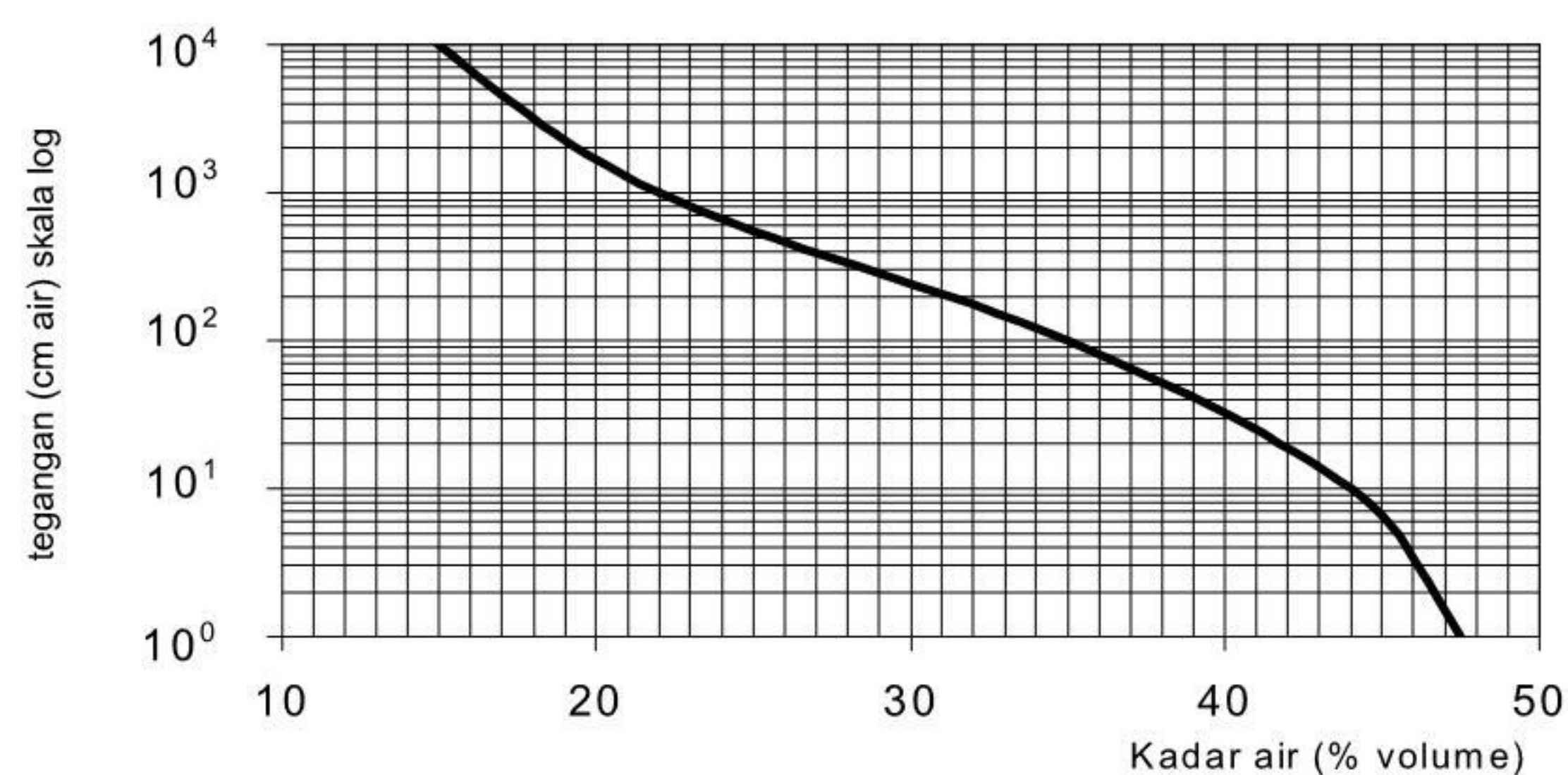
The logo for BSNi (Berkas Sampah Nasional Indonesia) is displayed. It features the letters "BSNi" in a bold, purple, sans-serif font. A red dot is positioned above the "i". To the right of the text is a green circular graphic element, resembling a stylized leaf or a partial circle.

Tabel B.3 Data hasil pengukuran tegangan hisap tanah

1. Nomor titik : 2
2. Lokasi : Komplek Kantor Puslitbang Sumber Daya Air
Ciparay, Bandung
3. Penggunaan lahan : Ladang dengan tanaman ubi jalar dan singkong
4. Karakteristik tanah : Struktur remah, tekstur lempung pasir
5. Spesifikasi tensiometer: Cat #2600, $\varnothing = 2,26$ cm, skala max = 850 mbar, dilengkapi
Dengan pipa besi pemandu \varnothing luar = 2.14 cm
6. Kedalaman cawan : 30 cm
7. Pengamat : Asep Saefudin
8. Keterangan tambahan :



Sketsa orientasi lokasi potensiometer

Contoh kurva karakteristik kelembaban tanah
di Komplek kantor Puslitbang Sumber Daya Air, Ciparay.

No urut	Tg-BI-Thn pengamatan	Pembacaan (mbar)	Penghitungan			Keterangan
			(cm air)	pF	Kadar air (%volum)	
1	1-12-1983	443	451,9	2,65	26,5	
2	2-12-1983	503	513,1	2,70	25,6	
3	3-12-1983	72,5	74,0	1,86	36,4	
4	4-12-1983	78	79,6	1,89	36,2	
5	5-12-1983	123	125,5	2,09	34,2	
6	6-12-1983	123	125,5	2,09	34,2	
7	7-12-1983	62	63,24	1,79	37,1	
8	8-12-1983	62	63,24	1,79	37,1	
9	9-12-1983	49	50,0	1,69	38,2	
10	10-12-1983	69	70,4	1,84	36,7	
11	11-12-1983	74	75,5	1,87	36,5	
12	12-12-1983	78	79,6	1,89	36,0	
13	13-12-1983	89	90,8	1,95	35,1	
14	14-12-1983	100	102,0	2,00	35,0	
15	15-12-1983	154	157,0	2,19	32,5	
16	16-12-1983	246	250,9	2,39	30,0	
17	17-12-1983	310	316,2	2,49	29,3	
18	18-12-1983	390	397,8	2,59	27,5	
19	19-12-1983	390	397,8	2,59	27,5	
20	20-12-1983	80	81,6	1,90	36,0	
21	21-12-1983	42	42,8	1,63	39,3	
22	22-12-1983	90	91,8	1,95	35,5	
23	23-12-1983	120	122,4	2,08	34,4	
24	24-12-1983	150	153,0	2,18	33,5	
25	25-12-1983	205	209,1	2,31	34,8	
26	26-12-1983	355	362,1	2,55	27,8	
27	27-12-1983	340	346,8	2,53	28,0	
28	28-12-1983	130	132,6	2,11	33,5	
29	29-12-1983	160	163,2	2,20	37,4	
30	30-12-1983	200	204,0	2,30	31,3	
31	31-12-1983	180	183,6	2,26	36,0	

Bibliografi

1. Baver, L.D., Gardner, W.H., Gardner, W.H., 1972., *Soil Physics*. Wiler, New York
2. Eagleson, P.S., 1970., *Dynamic Hydrology*., McGraw-Hill Inc., USA.
3. Goeswono Soepardi, 1979., *Sifat dan Ciri Tanah*, Institut Pertanian Bogor., Bogor
4. Linsley JR, R.K.; Kohler, M.A.; Paulhus, J.L.H., 1988., *Hydrology for Engineer SI Metric edition*., McGraw-Hill Book Company, England.
5. Ward, R.C., 1975, *Principles of Hydrology*, McGraw-Hill Book Company, England

